

気候変動に伴う港湾施設設計の課題と対応

鈴木 高二郎

国立研究開発法人 海上・港湾・航空研究所 港湾空港技術研究所
特別研究主幹（沿岸・海洋研究担当）

はじめに

令和4年4月に港湾施設の技術上の基準・同解説に港湾における気候変動適応策の実装が明記された。そこで本稿では防波堤と護岸に関して、近年の台風被害と今後予測される越波量の増加を中心に整理し、それに対する設計基準や技術的対応の方向性について論じる。

台風による港湾施設の被害

2016年から2019年にかけて、港空研では日本を襲った大型台風とその被害について現地調査を行った¹⁾。ここでは、そのいくつかを抜粋する。

2018年の台風21号では、関西国際空港や六甲アイランドが大規模な浸水被害を受け、各地で輸送機能が一時的に停止した。関西国際空港では滑走路やターミナルが広範囲に浸水し、復旧には数週間を要した。関西国際空港では潮位偏差、波高がともに大きく、大規模な越波浸水が発生した。六甲アイランドでも2m近い高さの浸水が一部で発生した。六甲アイランドでは経年的に地盤が沈下したことで浸水量が大きくなった。

一方、2019年の台風15号では横浜港の護岸が波力により図1のように破損し、越波が増加した。これらの護岸は護岸前からパラペットが後退した位置に設置された、後退パラペット構造の護岸だった。後退パラペットは越波量を低く抑えることができるものの、パラペットには強大な衝撃波力が作用するため、波力に対する十分な強度が必要だった。衝撃波力が発生すると重複波力の3倍以上の波力が発生するため、十分な考慮が必要である。また、2018年の台風24号では沖縄本島でマウンド透過波による大規模な護岸



図1 後退パラペットの倒壊（本牧D突堤）

の被害例も見られた。

これまで護岸では波力を考慮した設計が実施されている例があまり多くなかった。また、後退パラペットに働く衝撃波力やマウンド透過波については研究例も少なく、技術基準には記載されていなかった。平成30年基準ではこれらの事象についても記載されており、今後は波力を考慮した設計がなされていくものと考えられる。

今後の越波量の増大と設計の課題

最近の被害は構造物の構造上の問題によって発生しており、海面上昇の影響はまだ顕著に表れていない。しかしながら、海面上昇は越波流量の増加をもたらす可能性がある。

合田の越波流量算定図より、海面上昇時の越波流量と必要天端高を算定した²⁾。その結果、海面上昇にともなって越波流量は増加し、多くの場合、0.6mの上昇で越波流量が $0.04\text{m}^3/\text{m/s}$ となった。特に消波ブロックで被覆された護岸では水深が浅い場合の越波流量の増加が激しく、0.6m水位が上昇すると護岸の被災限界流量 $0.2\text{m}^3/\text{m/s}$ を超えている。また、周期が短い方が越波流量の増加が顕著だった。周期の短い護岸は比較的天端高が低いいため、相対的に水位上昇の影響を受けやすいものと推察される。

水位上昇時の必要天端高は設置水深が浅いほど上昇幅が大きかった。全般に、砕波や消波ブロックによって越波流量が抑制さ

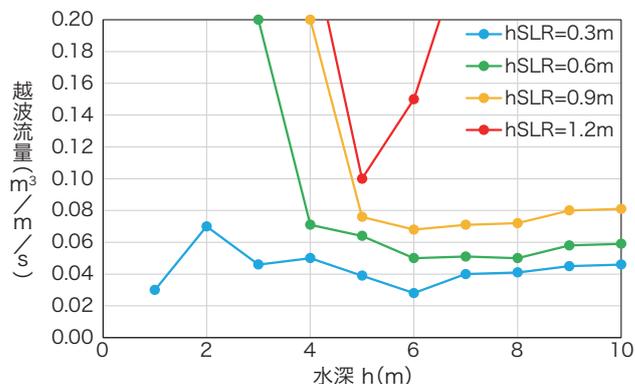


図2 消波ブロック被覆護岸での水深と越波流量の関係（海底勾配1/30、換算沖波波高3m、周期6s）、hSLRは海面上昇等による水位上昇量を示す

れている護岸では、水位上昇があると砕波による波高減衰が起りにくくなるほか、消波ブロックの静水位での幅が小さくなるなどして、越波流量が増加する傾向にあるものと推察される。

以下に外郭施設（防波堤、護岸、杭式栈橋）での海面上昇による懸念事項とその対策について述べる。

1) 防波堤 潮位上昇や波浪の増大にともなって、直立部の重量不足と滑動、転倒リスクの増大、越波量の増大にともなう波高伝達率の増加などが懸念される。対策としては、天端高の嵩上げや腹付工による抵抗力の増加、消波ブロック設置による波力、越波量の軽減などが考えられる。消波ブロック被覆堤の場合は消波ブロック層厚を増やすことも対策の一つであり、酒井ら（2024）によってその効果が明らかになってきている。堤内への消波工設置による波高伝達率の低減なども考えらえる。ただし、これらの対策には不明な部分もあり、例えば、上部工を嵩上げする場合には質量増加に伴うケーソン底板の強度不足が懸念されており、引き続き検討が必要である。また、海面上昇により防波堤全体が低天端化し、波力が小さくなることも考えられるが、定量的な検討が十分になされていない。

2) 護岸 潮位上昇と波浪の増大にともなって越波量が増加するほか、マウンド透過波の増大による吸い出し被害の増加、パラペット倒壊リスクの増大、堤内地盤高の相対的な低下による護岸破損時の浸水被害の激甚化（特に、堤内地盤高が水位より低くなる場合に排水ができなくなるリスクと逆流のリスクの増加）が懸念される。対策としては、改良型護岸（越波透水型、上部フレア、ダブルパラペット、後退パラペット等）の導入や越波防護壁などの比較的新しい工法も今後発展していくものと考えられる。ただし、背後地盤が低い場所は、抜本的に地盤高を高くしていく必要があるのではないかとと思われる。

3) 栈橋 課題：杭式の栈橋では、波の波面が上昇板に作用すると衝撃的な波圧が作用し、場合によっては上昇板の破損につながる恐れがある。通常、港内では波が小さいので問題にならないが、防波堤の開口部などからの波の作用が大きい場合には海面上昇により、波面の衝突頻度が高くなる可能性がある。対策として、前垂れの設置などが考えられる。また、設計では斜め入射に関する検討が行われていなかったが、斜め入射の場合、波力が抑えられることが明らかになってきており^{3) 4)}、今後設計で考慮できるものと考えられる。

4) 岸壁 高潮時の越波による岸壁上の浸水現象を平面的に再現する数値計算モデルの開発や、岸壁天端高の嵩上げや岸壁上に設置する胸壁による越波浸水対策、及び、胸壁の設計波浪諸元や作用波力の算定手法に関する検討が波浪研究Gにより進められている^{5) 6)}。

今後の技術的な対応

海面上昇による波力や越波量の影響を調べたり、実際にその対策を検討する際、直立護岸であったり、消波ブロック被覆護岸の場合には合田の越波流量算定図から越波量を推定できる。しかしながら、スリットケーソンなど様々な構造があり、複雑な場合は水理模型実験や数値シミュレーションによって検討する必要がある。本格的に設計の案件が増えてきた場合には、実験では対応しきれず、今後CADMAS-SURFのような数値シミュレーションも併用して検討していくことになると考えている。現在、沿岸センターを事務局として、複数の会社が集まってCADMAS-SURF研究会という会合が開かれ、現在、実務に使うためのマニュアルの作成作りが行われている。また、港空研ではPARISPHREというより精度が高く汎用的な粒子法モデルも精力的に開発が進められている。

消波ブロックの安定性や空気の取り扱いなど、まだ解決できていない課題はあるものの、今後徐々に数値シミュレーションによる設計事例が増えていくものと考えている。

一方、ブロックの安定性などの現象は、今後も水理模型実験を併用して設計していく必要がある。近年、計測機器や解析技術が進歩してきており、より効率的に実験を行っていくことができるようになってきている。

被害を受けた地域では、迅速な復旧を可能にする体制づくりが重要である。応急措置としての土嚢や袋詰め被覆工の設置法や、被害後の修復作業を迅速化するための資材の備蓄方法など、今後技術開発の要素が多くあるものと考えている。これにより、被害を受けた港湾施設の機能回復がスムーズに進むことが期待される。

おわりに

近年の台風被害と今後予測される海面上昇の影響を踏まえ、港湾施設の設計や技術基準の見直しが必要である。本稿で示した知見が、今後の防災対策や持続可能な地域社会の発展に寄与することを願っている。

参考文献

- 1) K.Suzuki, et al. (2024): Damage to Japanese Port Facilities caused by Recent Typhoons, ICE Virtual Library
- 2) 小林、鈴木 (2024): 海面上昇による護岸の越波流量の増加について、土木学会論文集
- 3) 渡部、木村 (2003): 栈橋床版に働く揚圧力特性に関する水理模型実験、土木学会北海道支部論文報告集
- 4) 中澤ら (2024): 栈橋に作用する斜め入射時の揚圧力の新たな設計法に関する基礎的研究、土木学会論文集
- 5) 濱野、平山 (2021): 時間変化する波浪・潮位に対するビジネスモデルによる埠頭越波浸水計算、土木学会論文集
- 6) 平山ら (2024): ビジネスモデルにより算定される波圧の鉛直分布に関する考察、土木学会論文集